第38卷 第3期
2021年5月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 38 No. 3
May 2021

念青唐古拉山西段冰湖时空变化分析

陶 静[1]， 赵文吉[1]， 王 旭[2]， 薛 进[3]

（1. 首都师范大学资源环境与旅游学院，北京 100048；2. 中国地质大学（武汉）地理与信息工程学院，湖北 武汉 430074；3. 深圳市龙华区发展研究院，广东 深圳 518110）

摘 要：基于多源、多期遥感影像与DEM提取的冰湖数据，分析了念青唐古拉山西段1991—2017年冰湖不同维度的分布变化，在此基础上研究了冰湖数量、面积变化与气温、降水变化的关系。结果表明：（1）近年来，研究区的冰湖数量与面积均呈上升趋势，冰湖数量增加161个，面积增加1.185 km^2。其中，1991—2006年平稳增长，2006—2017年大幅增长。（2）冰湖面积与数量在中高海拔范围内均呈增长趋势。新增冰湖主要分布在海拔5400~5700 m，冰湖数量占整体数量的72.41%。（3）分布在不同朝向冰湖的增长速率不同。西南向冰湖增长较为迅速，朝北向冰湖增长相对缓慢。（4）气温上升引起的冰川消融是冰湖生长的间接因素，降水是冰湖生长的重要因素。面积小的冰湖对气候的响应更灵敏，变化更显著，面积大的冰湖，变化幅度小，表明冰湖的动态变化与气候变化紧密相关。通过探究念青唐古拉山西段冰湖变化对冰湖溃决灾害的预测具有重要的指示意义。

关键词：念青唐古拉山西段；遥感；冰湖；气候变化

冰川湖泊是在冰川退缩消融后为了填充侵蚀、消蚀形成的洼地而形成的蓄水体系，简称冰湖。大多数冰湖位于水文基准面之上[1]，其生长受季节和年份等时间尺度的影响，是气候变化与冰川退缩共同作用所形成的产物，因此多数冰湖是短暂的，冰湖被认为是全球变化的天然指示器之一[2]。在全球范围气候变暖趋势下，高亚洲地区冰川后退现象显著[3-4]，而冰川后退常伴随着冰川湖泊的变化[5]。

冰湖的形态及其变化情况不仅能侧面反映出全球气候的整体变化趋势，也能为评价冰湖溃决灾害做出预警[6]。青藏高原包含许多大型冰碛基地湖泊，这些湖泊近几十年来不断扩大[7-8]，因此，青藏高原最近冰湖溃决（Glacial Lake Outburst Flood，GLOF）的频率和幅度可能高于其他地区。有效获取冰湖信息并对冰湖的状态进行监测分析，可以帮助识出具有溃决风险的冰湖并及时对其风险做出预测、预报。

近年来国内外主要对喜马拉雅山地区[9-12]、天山地区[13-14]、别珍套山[15]等地区的冰湖变化进行研究讨论，关于气候与冰湖耦合研究方面主要是针对喜马拉雅山[16]、珠穆朗玛峰[17]、科西河流域[18]及阿尔泰山[19]等大尺度地区进行研究，而针对小尺度地区，如念青唐古拉山地区的研究极少，而念青唐古拉山作为高亚洲地区冰湖主要分布的区域，对其冰湖特征及其变化进行分析具有实际意义。

1 研究区概况与方法

1.1 研究区概况

念青唐古拉山位于西藏纳木错地区与林芝地区的交界处，呈东西走向，自西起冈底斯山脉，向东北延伸，至那曲附近与横断山脉相连，东北向紧邻雅鲁藏布江最大的支流拉萨河流域。海拔范围在3000~7000 m，平均海拔5500 m。核心研究区位于念青唐古拉山西段（30°34′~30°34′N，89°51′~90°49′E），研究区DEM影像的轮廓范围如图1。念青唐古拉山脉西段的冰川属于亚大陆性冰川，而山脉东段却受印度洋西南季风影响显著，降水多，雪线海拔低，冰川分布集中，占整个山岳冰川总量的80%以上，是中国最大的大陆性冰川集中地区，也是地球上中低

收稿日期：2020-07-29； **修订日期：**2020-09-16
基金项目：国家自然基金项目（41971381）；北京水务局重点项目（TAHP-2018-ZB-YY-490S）；中央高校基金资助项目（CUG160818）
作者简介：陶静（1997-），女，硕士研究生，主要从事资源环境遥感研究. E-mail: jingt_yeol@163.com
通讯作者：赵文吉. E-mail: zhwenji1215@163.com

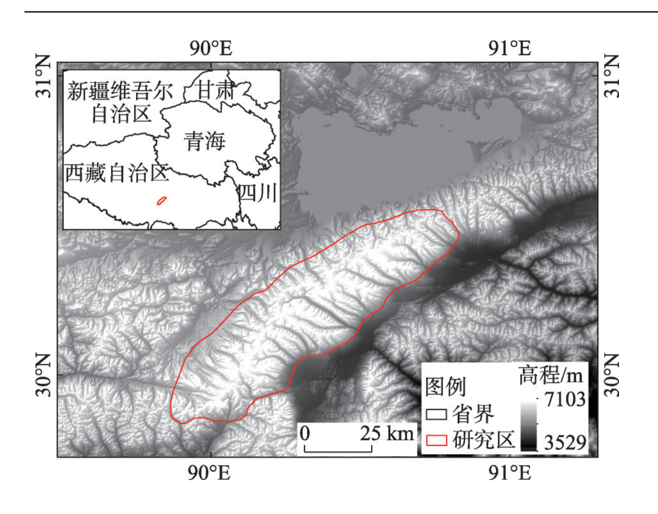


图1　研究区位置示意图

Fig. 1　Location of the study area

纬地区最强的冰川作用中心之一。

念青唐古拉山西段属于半干旱大陆性气候,年均气温常位于0 ℃以下,年降水量在300~400 mm。夏季,当地气候受温暖潮湿的季风气团控制,主要从南部穿过雅鲁藏布江山谷。季风气团携带大量水分,使东部念青唐古拉山成为整个青藏高原平均降水率最高的地区,6—9月降水量可达全年降水量的80%。夏季日最高气温可达12 ℃,冰川更易产生剧烈的消融促进冰湖的生长;冬季,西风主导了环流模式,主要输送来自青藏高原的冷干气团,导致冬季降水量少且气温低,最低气温为−13.7 ℃。

1.2　数据来源

本研究所采用的数据资料包括遥感影像数据、DEM数据和气象数据。Landsat系列数据来源于美国地质调查局(USGS,https://glovis.usgs.gov/app)和地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/),Google Earth遥感影像来源于BIGEMAP(http://www.bigemap.com/)。在选取遥感影像时,需注意影像成像时间与云量覆盖率等因素的影响,选取9—10月冰湖形态稳定的秋季影像,同时要挑选云量较小的数据,降低云量对研究过程中提取冰湖信息的干扰。除此之外,采用Google Earth 15级数据,分辨率为4 m的遥感影像作为参考,评估信息提取结果的精度[20]。遥感影像数据基本信息见表1。SRTM DEM数据来源于美国国家航空航天局(NASA,https://urs.earthdata.nasa.gov),分辨率为90 m×90 m,数据重采样后得到30 m分辨率的DEM数据,基于该数据派生的高程、坡向、坡度等信息进行冰湖分布变化分析。气象数据来源于中国科学院资源环境数据云平台(http://www.resdc.cn/Default.aspx),选取1990—2015年全国逐年平均气温、年降水量空间插值数据集。与气象站点无法获得偏远地区数据且检测到的数据呈分散点相比,该数据集是经过插值处理后得到空间平均温度,获得的气象数据精度更高,可信度更强。

1.3　研究方法

国内外运用遥感技术提取水体的方法较多,主要包括目视解译手工数字化[21]、基于光谱信息的阈值法和NDWI指数法[22]、基于机器学习的卷积神经网络、决策树和支持向量机等方法[23],以及基于图像分割方法的“全域-局部”法[24]和面向对象法等[25]。除此之外,还有“全域-局部”与NDWI相结合[26]、Sentinel-1图像与Landsat 8图像结合[27]及半自动提取[28-29]等方法。因本文研究区域范围较小,研究对象又多分布在冰川末端,冰湖面积大多又小于0.01 km^2,采用自动或半自动方法提取的冰湖轮廓并不准确,后期还需人工核对,故选取能够直接获取高

表1　研究区遥感数据

Tab. 1　Remote sensing data of the glacial lakes in the study area

传感器	成像时间	轨道参数	平均云量/%	分辨率(全色/多光谱)/m	用途
Landsat 4/5 TM	1991-09-15	138/039	7	30/120	冰湖提取
Landsat 4/5 TM	1996-10-13	138/039	4	30/120	冰湖提取
Landsat 7 ETM+	2001-11-04	138/039	3	15/30	冰湖提取
Landsat 5 TM	2011-10-07	138/039	4	30/120	冰湖提取
Landsat 7 ETM+	2010-09-26	138/039	38.12	15/30	参考数据
Landsat 7 ETM+	2012-10-17	138/039	30.3	15/30	参考数据
Landsat 8 OLI	2017-10-07	138/039	5.58	15/30	冰湖提取
Landsat 8 OLI	2017-10-23	138/039	2.67	15/30	参考数据
Google Earth	2017-10-09	-	-	4	参考数据

精度冰湖信息的手工数字化方法。借助地理信息系统软件完成冰湖的矢量化,因山体阴影与冰湖不易区分,故在提取冰湖前根据影像数据的太阳高度及太阳方位角进行山体阴影渲染,矢量化过程中保证误差不超过一个像元值,将提取结果与DEM派生数据坡度图进行叠加分析,坡度小于5°的水体认定为冰湖,大于5°的则被认为是山体阴影等干扰项,去除干扰项后保留其余冰湖提取信息[26]。参考Google Earth 15级(分辨率为4 m)的影像、相近时期影像数据和地形图辅助判别。对冰湖提取结果进行空间分析以供后期分析冰湖变化,获取冰湖的各项属性,包括冰湖编号、冰湖面积、冰湖平均高程、冰湖坡度、坡向、冰湖变化类型和冰湖规模。

假设冰湖面积的提取误差符合高斯分布[30],则可通过冰湖的周长确定像元个数、影像的最大分辨率和随机权重误差来计算影像解译中所产生的面积误差,公式如下:

$$u_\alpha=\left(\frac{p}{\lambda}\right)\sigma\left(\frac{\lambda^2}{2}\right)=\frac{p\lambda\sigma}{2} \quad (1)$$

式中:u_α为冰湖面积误差(km^2);p为冰湖周长(m);λ为像元最大分辨率(30 m);σ(0.6872)为随机权重误差,假设69%的像元会出现误差。

影像质量、像元分辨率、几何配准技术以及人工经验等均会对冰湖信息提取的精度产生影响。本文主要侧重探讨念青唐古拉山区域冰湖整体在1991—2017年的变化规律,而不是以单个冰湖作为对象研究逐个像元的变化,所以造成的误差都是系统性的。另外,在时间变化分析的过程中,边界误差会在6期数据的对比中相互抵消一部分,因此,像元配准的误差对念青唐古拉山区域冰湖整体变化规律认识的影响有限。

采用参数统计的线性相关系数法分析了气温、降水对冰湖面积及数量变化的影响。线性相关系数又称为简单相关系数、Person(皮尔森)相关系数等,常以符号r表示样本相关系数,ρ表示总体相关系数。总体相关系数的定义公式如下:

$$\rho_{XY}=\mathrm{Corr}(X,Y)=\frac{\mathrm{Cov}(X,Y)}{\sqrt{\mathrm{Var}(X)}\sqrt{\mathrm{Var}(Y)}} \quad (2)$$

式中:$\mathrm{Cov}(X,Y)$是随机变量X、Y的协方差;$\mathrm{Var}(X)$和$\mathrm{Var}(Y)$分别代表X和Y的方差。总体相关系数是反映两变量之间线性相关程度的一种特征值,表现为一个常数。设$X_1, X_2, \cdots, X_n$、$Y_1, Y_2, \cdots, Y_n$分别是总体X、Y一组简单随机样本,样本相关系数的计算公式如下:

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\bar{X})(Y_i-\bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\bar{X})^2\sum_{i=1}^{n}(Y_i-\bar{Y})^2}} \quad (3)$$

样本相关系数是根据样本观测值计算的,抽取的样本不同,其具体的数值也会有所差异。r的绝对值越大表明两变量间的相关性越大。

2 结果与分析

2.1 总体分布特征

通过上述方法得到1991年、1996年、2001年、2006年、2011年和2017年的冰湖信息(图2)。对研究结果进行统计分析,得出1991—2017年冰湖数量和面积变化特征(表2)。结果表明,从1991—2017年的27 a间,该区域冰湖数量增加了161个,面积增加1.185 km^2,数量增长率73.51%,但面积增长率仅为22.37%,数据表明这期间冰湖数量剧增,但冰湖面积并没有同步大幅增长。

从冰湖变化趋势的整体情况看,冰湖的数量和面积均呈增长趋势。其中,1991—1996年冰湖面积增长最快,增长速度为0.075 km$^2\cdot$a^{-1};2001—2006年冰湖面积增长最慢,为0.021 km$^2\cdot$a^{-1};2011—2017年冰湖面积增长适中,但冰湖数量增长最快,增长率达18.01%,2001—2006年冰湖数量增长与面积增长速度一致,增长率仅6.59%,为5个时段增长幅度最小的时期。

2.2 不同时期冰湖变化特征

1991—2017年念青唐古拉山西段冰湖存在新增、消失、退缩以及扩张现象,其空间分布特征见图3。冰湖变化主要出现在研究区的东北部,以扩张冰湖和新增冰湖为主,分别占31%、38%,消失冰湖数量最少,仅占6%。

念青唐古拉山西段1991—2017年新增冰湖137个,多数集中分布于研究区5500~5800 m的中高山区,新增冰湖的面积为1.373 km^2,在冰湖4类变化类型中其数量与面积变化均是最大的变化类型。新增冰湖平均面积为0.008 km^2,其中,冰川终碛湖是新增冰湖的主要类型,也是念青唐古拉山西段冰湖规模变大的主要类型。图4a为两个典型新增冰湖的空间分布,冰湖位置分别位于海拔5623 m和

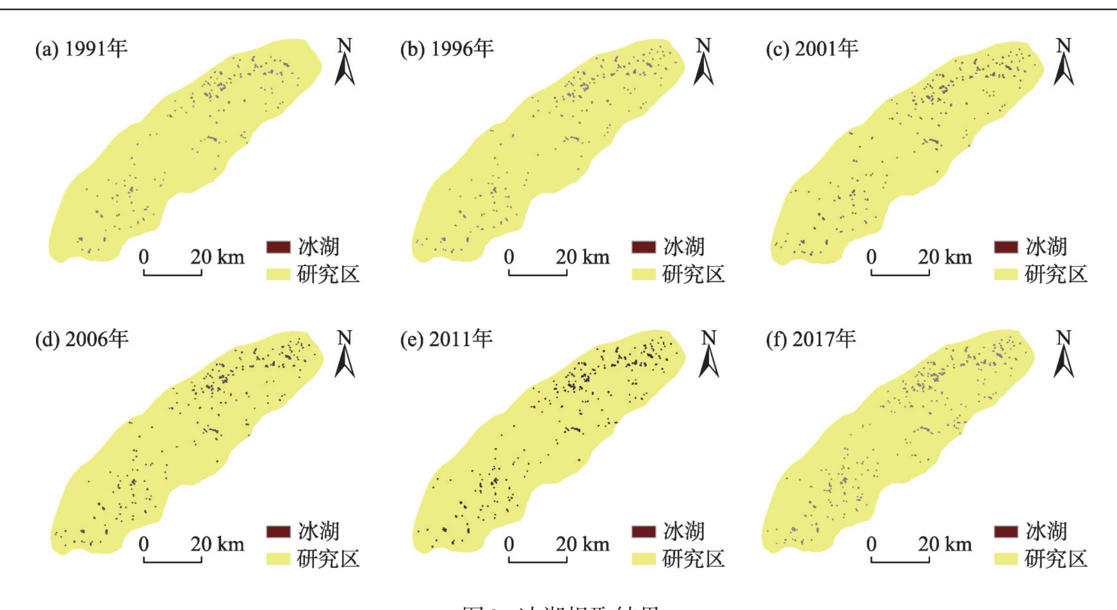


图2　冰湖提取结果

Fig. 2　The extraction results of glacial lakes

表2　1991—2017年冰湖数量与面积变化

Tab. 2　Glacial lakes changes during 1991−2017

年份	面积/km²	数量/个	较前一时期面积变化/km²	较前一时期增加的冰湖数量/个
1991	5.297	219		
1996	5.674	253	0.377	34
2001	5.913	273	0.239	20
2006	6.022	291	0.109	18
2011	6.276	322	0.254	31
2017	6.482	380	0.206	58

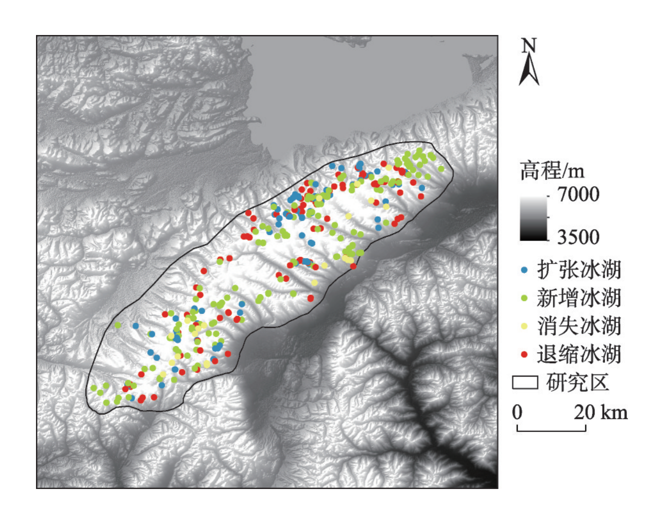


图3　1991—2017年念青唐古拉山西段冰湖不同变化类型空间分布

Fig. 3　Distribution of different change types of glacier lakes of the study area during 1991−2017

5560 m处,均是因冰川退缩形成的冰川终碛湖[31]。念青唐古拉山西段1991—2017年共消失23个冰湖,消失面积为0.328 km²。消失冰湖类型主要为冰碛湖[31],图4b为两个典型消失冰湖的空间分布,分别位于海拔为5350 m和5380 m处。从遥感影像判断,消失冰湖可能是由于终碛堤溃决,从而使冰湖疏干。

念青唐古拉山西段1991—2017年有90个冰湖退缩,退缩面积为2.902 km²。退缩冰湖多数分布在海拔5400~5600 m,以冰碛阻塞湖[31]为主。图5a为位于海拔5683 m处典型退缩冰湖的空间分布,该冰湖主要是由于冰川末端的持续退缩,冰湖缺少足够的冰川融水补给而缩小[32]。念青唐古拉山西段1991—2017年扩张冰湖共110个,扩张后的冰湖面积为2.119 km²,主要分布在5500~5900 m的中高山区,变化类型主要为冰碛阻碛湖中的侧碛阻塞湖与终碛阻塞湖[31]。图5b为典型扩张型冰湖,该湖位于海拔5670 m处,属于受冰川侧碛垄阻挡积水而形成的侧碛阻塞湖[31]。

2.3　不同海拔冰湖变化特征

念青唐古拉山地区冰湖分布在海拔4900~6100 m范围之内,从整体看,冰湖数量趋于单峰分布模式

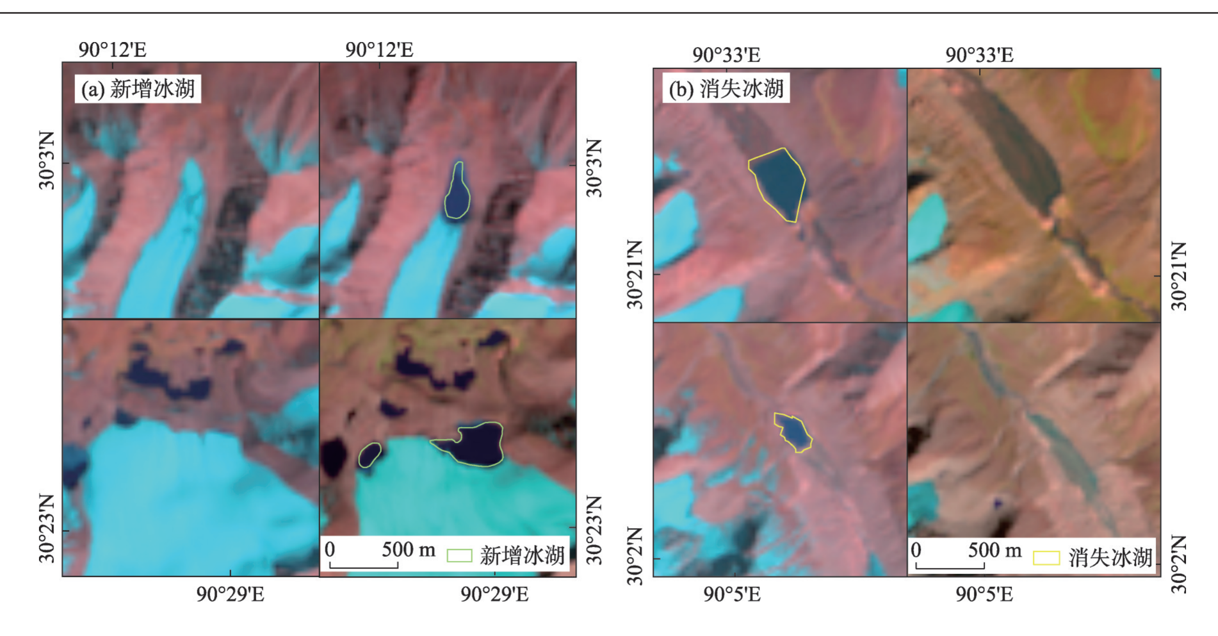


图4 典型新增、消失冰湖类型空间分布

Fig. 4 The new formed glacier lakes and disappear of glacier lakes in the study area

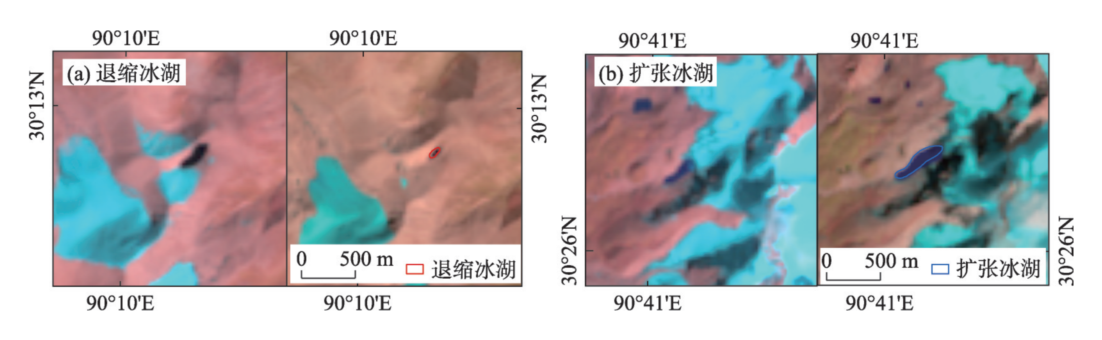


图5 典型退缩、扩张冰湖示意图

Fig. 5 The shrinkage glacier lakes and expansion of glacier lakes in the study area

(图6),峰值主要出现在海拔5400~5700 m,该海拔区间内的冰湖数量占整个研究区的72.41%,冰湖面积占总面积的62.6%。以每100 m为一个高度带,将整个海拔范围分为11个区间进行分析,得到5500~5600 m和5600~5700 m为冰湖的主要分布区域,冰湖数量与冰湖面积占比均高于其他海拔范围。此外,念青唐古拉山冰川末端海拔趋于正态分布,且集中分布在5400~5700 m[33],这与该区海拔5400~5700 m的冰湖变化较为显著相一致,故中高海拔区域的冰川消融退缩是造成念青唐古拉山区域冰湖形成与演变的主要原因。

从1991—2017年不同海拔冰湖数量和面积来看,位于5800~5900 m的冰湖面积与数量变化最大,数量增长的同时面积也随之增长。相对于中高海拔区域冰湖的显著变化,海拔较低区域冰湖变化则较小,海拔小于5300 m的冰湖面积变化相对稳定,说明低海拔区域的冰湖距离冰川较远,受冰川的影响也较小,冰湖形态不易发生变化;海拔5300~5400 m的冰湖面积从1991—2001年呈增长状态,2001—2017年又逐渐减少,面积持续减少至0.582 km^2,减少幅度为21.8%;海拔5400~5500 m、5500~5600 m和5600~5700 m的冰湖在2011—2017年趋于稳定增长状态,增长面积分别以7.2%、6.12%和4.53%的平均速率增长,冰湖的数量也逐年增加,增幅分别为24%、87.72%和77.05%,因此,1991—2017年念青唐古拉山西段区域的冰湖在5400~5500 m、5500~5600 m中高海拔处的变化,是冰湖面积与数量逐年增加的主要区域;海拔5800~5900 m的冰湖在2001年后数量及面积也急速增长,1991—2017年冰湖数量增幅为73.52%,冰湖面积以0.025 $km^2\cdot(5a)^{-1}$的速度增长,这表明高海拔冰湖对气候变化的反应更灵敏,也表明高海拔冰川的退缩为冰湖的形成提供了物质来源[34]。除此之外,念青唐古拉山西段冰川末端海拔为5500~7000 m,且海拔高于5700 m的冰川

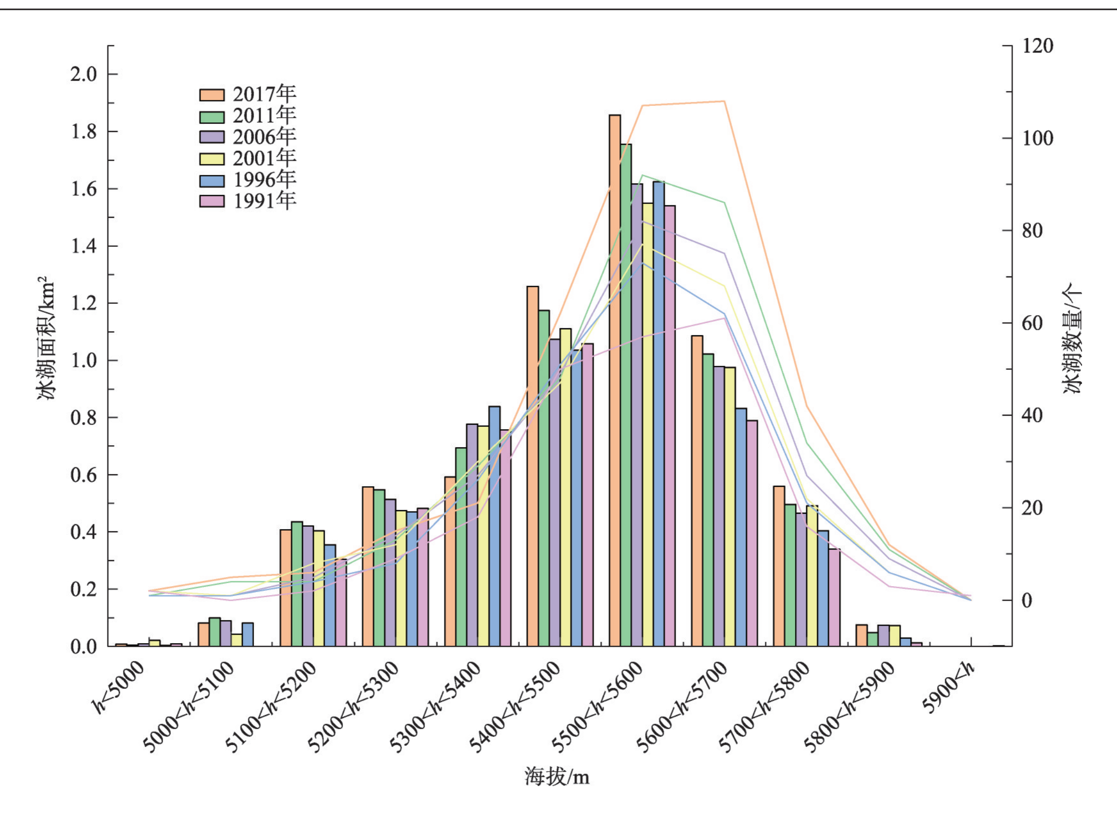


图6 1991—2017年念青唐古拉山西段不同海拔冰湖面积与数量变化

Fig. 6 The number and area variation of different-elevation glacier lakes in western Nyainqentanglha range during 1991−2017

退缩较严重[35],这与该区域海拔5500~5800 m冰湖变化较显著的结果一致,即冰川退缩是冰湖数量及面积增加的直接原因。

2.4 不同朝向冰湖变化特征

念青唐古拉山西段冰湖面积在不同朝向上具有差异,主要分布在南、东、东南和西南向(图7a),面积占比分别为22.68%、21.67%、18.01%和17.75%,共占冰湖总面积的80.2%;西北向最少,仅占总面积的7.2%,其次为朝北向,占总面积9.99%。

1991—2017年念青唐古拉山西段冰湖在不同朝向上的数量与面积变化(表3),冰湖数量在南和西南向的变化最为显著,其中朝南向变化最大的时期为1991—1996年,数量增加了近一倍(图7b);西南向变化最大的时期也在1991—1996年,数量增加了近2倍,北和西北向的冰湖变化幅度较小,尤其是朝北向,基本上趋于稳定,这与该地区冰川变化一致,念青唐古拉山西段冰川在北向上退缩程度弱于南向,冰川融水对其附近的冰湖面积及数量扩张贡献明显[36]。

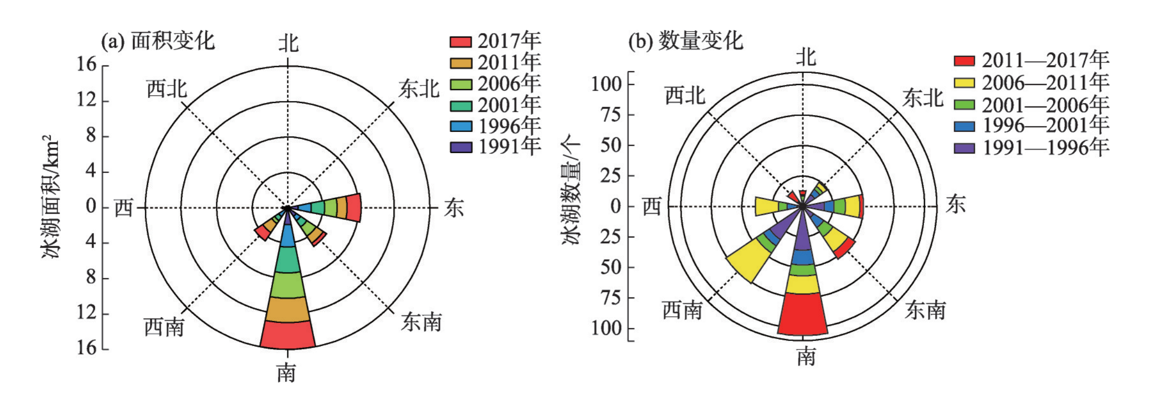


图7 1991—2017年念青唐古拉山西段不同朝向冰湖分布

Fig. 7 The area variation of different-aspect glacier lakes in western Nyainqentanglha range during 1991−2017

表3　1991—2017年不同朝向冰湖数量与面积变化

Tab. 3　Variation of different-aspect glacier lakes changes during 1991-2017

朝向	1991年		1996年		2001年		2006年		2011年		2017年	
	面积/km²	数量/个	面积/km²	数量/个	面积/km²	数量/个	面积/km²	数量/个	面积/km²	数量/个	面积/km²	数量/个
北	0.001	1	0.005	3	0	0	0.005	4	0.005	3	0.009	6
东北	0.47	19	0.0203	7	0.047	13	0.062	16	0.04	12	0.056	13
东	1.232	37	1.48	19	1.496	27	1.358	36	1.113	24	1.601	27
东南	1.203	55	0.604	44	0.846	54	1.268	63	0.928	48	0.442	55
南	1.928	69	2.556	105	2.903	117	2.861	108	2.721	123	3.007	157
西南	0.386	18	0.885	51	0.539	45	0.361	38	1.243	68	1.111	68
西	0.055	12	0.09	17	0.038	9	0.08	16	0.172	35	0.178	35
西北	0.021	8	0.035	7	0.044	8	0.026	10	0.053	9	0.079	19

2.5　不同规模冰湖变化

湖泊是陆地表面具有一定规模的天然洼地的蓄水体系，是湖盆、湖水以及水中物质组合而成的自然综合体[31]，通常分布在坡度较小的洼地或深谷，地形起伏复杂的高原山地地貌，以冰缘地貌为代表，难以形成中大规模湖泊。而冰川湖泊就分布在典型的冰缘地貌地带，是冰川作用后在平坦洼地形成的自然蓄水体，规模往往较小。在分析过程中将冰湖面积分为5种规模，并统计了不同规模的冰湖数量及面积情况(表4)。念青唐古拉山西段最小冰湖面积低至0.0002 km²，最大冰湖面积可达0.332 km²,面积平均值为0.017 km²。其中，绝大多数冰湖为面积小于0.05 km²的小型冰湖，面积小于0.01 km²的冰湖数量占比超过冰湖总数量的50%。

分析发现，面积<0.01 km²的冰湖与0.01~0.05 km²的冰湖数量占冰湖总数量的85%以上；面积在0.1~0.2 km²与>0.2 km²冰湖数量仅占5%，总的来看冰湖面积愈大数量愈少。从不同规模面积总和来看，面积在0.01~0.05 km²冰湖面积总和占比最大，可达30%以上，其次为面积为0.10~0.20 km²的冰湖。

由表4可知，1991—2017年念青唐古拉山西段冰湖面积增加主要为<0.01 km²与0.01~0.05 km²的冰湖。面积<0.01 km²的冰湖数量最多，且生长速度最快，数量增长速度为27.6个·$(5a)^{-1}$，该规模冰湖总面积除在2006年有所减少，其余时期均呈增长状态；面积为0.01~0.05 km²的冰湖数量逐年递增，且面积随着冰湖数量增加稳定增长，增幅为0.633 km²，五种不同规模冰湖中增幅最大。以上两种规模冰湖是念青唐古拉山西段冰湖面积增加与数量增多的主要因素，说明该区域内小规模的冰湖演化更为激烈。面积为0.05~0.1 km²的冰湖面积1991—2001年均呈增长状态，但2001—2017年有增有减，面积峰值出现在2011年，为1.347 km²。1991年起面积为0.1~0.2 km²冰湖数量与面积均呈下降趋势直至2011年，2011年后面积为0.1~0.2 km²冰湖数量及面积呈增长状态，但未回到1991年的峰值；面积>0.2 km²的冰湖较为稳定，面积增幅仅为0.087 km²，数量增幅为0，且该规模冰湖均位于低海拔，说明大面积、低海拔的冰湖形态较为稳定，受冰川退缩及气候因素的影响小，有一定维稳能力。即小型

表4　1991—2017年念青唐古拉山西段不同面积规模冰湖变化

Tab. 4　The number and area variation of different-sized glacier lakes in western Nyainqentanglha range during 1991-2017

冰湖规模/km²	1991年		1996年		2001年		2006年		2011年		2017年	
	数量/个	面积/km²	数量/个	面积/km²	数量/个	面积/km²	数量/个	面积/km²	数量/个	面积/km²	数量/个	面积/km²
<0.01	117	0.532	144	0.693	161	0.814	183	0.723	209	0.901	255	0.981
0.01~0.05	75	1.611	81	1.79	82	1.8334	79	1.881	81	1.857	97	2.244
0.05~0.10	13	0.864	16	1.127	19	1.318	15	1.042	20	1.347	15	1.037
0.10~0.2	12	1.792	8	1.125	8	1.251	10	1.381	10	1.555	11	1.636
>0.2	2	0.497	4	0.939	3	0.696	4	0.994	2	0.615	2	0.584

冰湖的面积波动大,对气候的反应更敏感。相反,大型冰湖对气候变化的反应迟钝,保持原状的能力更强不易产生变化。

2.6 冰湖变化特征与气象因素影响分析

众多指示气候的因子中气温和降水能直接反映气候变化,且是影响冰湖变化的主要因子,降水量与气温的变化会影响冰川的生长与退缩,冰川退缩消融与降水都是形成冰湖的物质来源。

从念青唐古拉山西段年均气温变化图可以看出(图8a),研究区气温变化波动较大,但年均温度均低于0 ℃。其中,年均最低温度-3.38 ℃出现在1997年,最高温度-1.07 ℃出现在2010年。虽然气温波动幅度大,无固定变化规律,但该区域年均温度趋势线1990—2015年总体呈持续上升趋势,这与施雅风等人研究得出小冰期盛世(17世纪)以来中国西部山区气温增加的结论一致[3]。近年来,念青唐古拉山西段气温逐渐上升导致了冰川的剧烈退缩[35],冰川的消融为冰湖的形成提供了物质来源,这与本文研究冰湖数量与面积增加的结果相一致。

从念青唐古拉山西段逐年年降水量数据来看(图8b),年降水量均高于400 mm,气温变化幅度比降水变化幅度大,年降水量集中在400 ~ 800 mm。整体与气温变化趋势一致,年降水量也呈上升趋势,与气温变化不同,降水量的增幅小,上升幅度较平缓。冰湖的增加对降水量的变化反应敏感,新生冰湖和冰湖的扩张可能跟降水有关,这与本文研究不同冰湖类型中,新生冰湖和扩张冰湖数量最多的结果一致。

运用皮尔森相关系数法分析气温、降水与冰湖变化之间的相关性,由相关性分析结果可知(表5),气温与冰湖面积、数量的相关系数的绝对值都很小,相关性并不显著,气温对冰湖变化的影响是间接的,在其他气候条件不变的情况下,气温升高会导致冰川融化进而促进冰湖面积的增长。降水与冰湖面积、数量之间的相关系数绝对值接近0.6,相比与气温因素,降水因素与冰湖变化之间的相关性更为显著,说明降水是影响冰湖变化的重要因素。

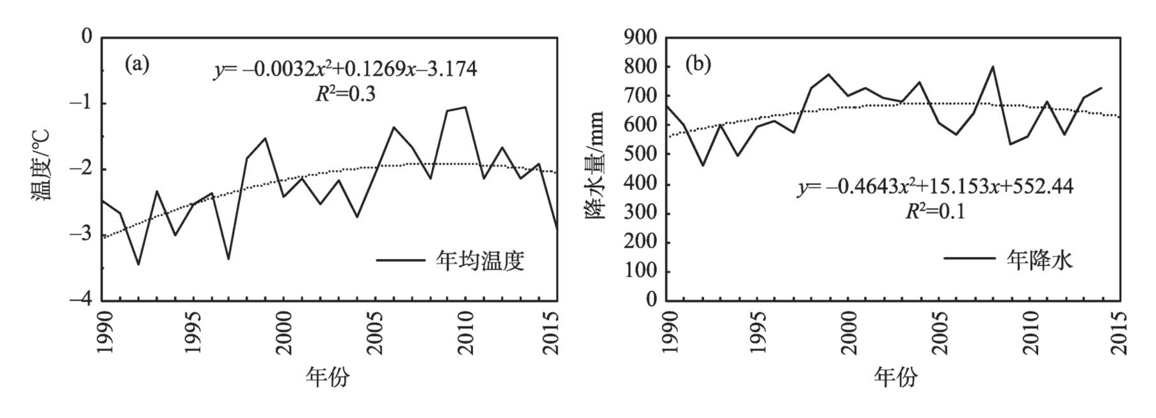


图8 1990—2014年念青唐古拉山西段年均气温和年降水量变化

Fig. 8 Variations of annual mean temperature and annual precipitation from 1990 to 2014

表5 气温、降水与冰湖面积、数量的相关性分析

Tab. 5 Correlation between temperature, precipitation and glacier lakes changes

	气温	降水	面积	数量
气温	1			
降水	−0.491	1		
面积	0.033	0.584	1	
数量	−0.163	0.591	0.969**	1

注:**表示在0.01水平(双侧)上显著相关。

3 结 论

(1) 1991—2017年念青唐古拉山西段的冰湖持续增长,1991—2006年平稳增长,面积增加至6.022 km²,2006—2017年涨幅增大,面积增加至6.482 km²;27 a来冰湖数量增加161个,面积增加1.185 km²。

(2) 冰湖面积与数量在中高海拔均呈增长趋势,5300~5400 m的低海拔冰湖面积呈减小趋势。新增冰湖主要分布在海拔5400~5700 m,冰湖数量

占整体数量的72.41%,说明高海拔处的冰湖对气候变化的响应更为敏锐,同时受冰川退缩的影响更大。

(3)不同朝向的冰湖分布与增长速率不同。西南向冰湖增长最为迅速,朝北向冰湖增长缓慢,不同朝向气温上升的速度不同从而影响冰湖的变化。

(4)冰湖面积<0.01 km^{2}与0.01~0.05 km^{2}的冰湖对气候的响应更灵敏,变化更显著,面积大于0.05 km^{2}的冰湖稳定性强,变化幅度小。

(5)气温与降水对冰湖的演化均有影响,气温是冰湖变化的间接因素,降水因素是重要因素。

参考文献(References):

[1] Benn D I, Wiseman S, Hands K A . Growth and drainage of supraglacial lakes on debrismantled Ngozumpa Glacier, Khumbu Himal, Nepal[J]. Journal of Glaciology, 2001, 47(159): 626−638.

[2] 张国庆, 王敬涛. 第三极冰湖变化: 全球气候变暖的指示器[N]. 中国气象报, 2015-07-09. [Zhang Guoqing, Wang Jingtao. Changes in the third polar ice lake: An indicator of global warming[N]. China Meteorological News, 2015−7−9.]

[3] 施雅风, 刘时银. 中国冰川对21世纪全球变暖响应的预估[J]. 科学通报, 2000, 51(4): 434−438. [Shi Yafeng, Liu Shiyin. Prediction of the response of Chinese glaciers to global warming in the 21st century[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 51(4): 434−438.]

[4] 商沙沙, 廉丽姝, 马婷, 等. 近54 a中国西北地区气温和降水的时空变化特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(1): 68−76. [Shang Shasha, Lian Lishu, Ma Ting, et al. Spatiotemporal variation of temperature and precipitation in Northwest China in recent 54 Years[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(1): 68−76.]

[5] 杨景春, 李有利. 地貌学原理[M]. 北京: 北京大学出版社, 2001. [Yang Jingchun, Li Youli. Principles of Geomorphology[M]. Beijing: Peking University Press, 2001.]

[6] Allen S K, Linsbauer A, Randhawa S S, et al. Glacial lake outburst flood risk in Himachal Pradesh, India: An integrative and anticipatory approach considering current and future threats[J]. Natural Hazards, 2016, 84(3): 1741−1763.

[7] 姚晓军, 刘时银, 孙美平, 等. 20世纪以来西藏冰湖溃决灾害事件梳理[J]. 自然资源学报, 2014, 29(8): 1377−1390. [Yao Xiaojun, Liu Shiyin, Sun Meiping, et al. Study on the Glacial lake outburst flood events in Tibet since the 20th century[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(8): 1377−1390.]

[8] 王坤鑫, 张寅生, 张腾, 等. 1979—2017年青藏高原色林错流域气候变化分析[J]. 干旱区研究, 2020, 37(3): 652−662. [Wang Kunxin, Zhang Yinsheng, Zhang Teng, et al. Analysis of climate change in the Selin Co Basin, Tibetan Plateau, from 1979 to 2017[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(3): 652−662.]

[9] Mool P K, Wangda D, Bajracharya S R, et al. Inventory of Glaciers, Glacial Lakes and Glacial Lake Outburst Floods. Monitoring and Early Warning Systems in the Hindu Kush-Himalayan Region: Bhutan[M]. Kathmanddu, Nelal: International Center for Integrated Mountain Development, 2001.

[10] Ageta Y, Iwata S, Yabuki H, et al. Expansion of glacier lakes in recent decades in the Bhutan Himalayas[J]. Debris Covered Glaciers, IAHS Publ, 2000, 264: 165−175.

[11] 李林, 边巴次仁, 赵炜, 等. 西藏喜马拉雅山脉中段冰湖变化与溃决特征分析: 以桑旺错和什磨错为例[J]. 冰川冻土, 2019, 41(5): 1036−1043. [Li Lin, Bianba Ciren, Zhao Wei, et al. Analysis of change and outburst feature of glacial lake in the middle Himalayas of Tibet: Take Sangwang Co and Shimo Co as examples[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(5): 1036−1043.]

[12] 王欣, 刘时银, 姚晓军, 等. 我国喜马拉雅山区冰湖遥感调查与编目[J]. 地理学报, 2010, 65(1): 29−36. [Wang Xin, Liu Shiyin, Yao Xiaojun, et al, Glacier lake investigation and inventory in the Chinese Himalayas based on the remote sensing Data[J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(1): 29−36.]

[13] 李达, 上官冬辉, 黄维东. 天山麦兹巴赫冰川湖1998—2017年面积变化相关研究[J]. 冰川冻土, 2019, 42(4): 1126−1134. [Li Da, Shangguan Donghui, Huang Weidong. Study on the area change of Lake Merzbacher in the Tianshan Mountains during 1998-2017[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 42(4): 1126−1134.]

[14] 王欣, 吴坤鹏, 蒋亮虹, 等. 近20年天山地区冰湖变化特征[J]. 地理学报, 2013, 68(7): 983−993. [Wang Xin, Wu Kunpeng, Jiang Lianghong, et al. Wide expansion of glacial lakes in Tianshan Mountains during 1990-2010[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(7): 983−993.]

[15] 王宇, 李均力, 李长春, 等. 50 a来别珍套山冰湖的时空变化及其对气候的响应[J]. 干旱区研究, 2016, 33(2): 299−307. [Wang Yu, Li Junli, Li Changchun, et al. Spatiotemporal change of glacial lakes in the Biezhentao Mountain and its response to climate change[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(2): 299−307.]

[16] 廖淑芬, 王欣, 谢自楚, 等. 近40 a来中国喜马拉雅山不同流域冰湖演化特征[J]. 自然资源学报, 2015, 30(2): 293−303. [Liao Shufen, Wang Xin, Xie Zichu, et al. Changes of glacial lakes in different watersheds of Chinese Himalaya during the last four decades[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(2): 293−303.]

[17] Benn D I, Bolch T, Hands K, et al. Response of debris-covered glaciers in the Mount Everest region to recent warming, and implications for outburst flood hazards[J]. Earth Science Reviews, 2012, 114(1−2): 156−174.

[18] 宫鹏, 姚晓军, 孙美平, 等. 1967—2014年科西河流域冰湖时空变化[J]. 生态学报, 2017, 37(24): 8422−8432. [Gong Peng, Yao Xiaojun, Sun Meiping, et al. Spatial-temporal variations of glacial lakes in the Koshi River basin from 1967 to 2014[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(24): 8422−8432.]

[19] 赵轩茹, 舒梅海, 王欣, 等. 基于遥感的1990—2015年阿尔泰山

区冰湖变化特征[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2019, 34(3): 96−102. [Zhao Xuanru, Shu Meihai, Wang Xin, et al. Change characteristics of glacial lake in Altai Mountains during 1990−2015 based on remote sensning data[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 34(3): 96−102.]

[20] 李成秀, 杨太保, 田洪阵. 近40年来西昆仑山冰川及冰湖变化与气候因素[J]. 山地学报, 2015, 33(2): 157−165. [Li Chengxiu, Yang Taibao, Tian Hongzhen. Variation of western Kunlun Mountain glaciers monitored by remote sensing during 1976−2010[J]. Mountain Research, 2015, 33(2): 157−165.]

[21] 王旭, 周爱国, 孙自永, 等. 1972—2009年念青唐古拉山西段冰湖分布及其变化特征[J]. 地质科技情报, 2012, 31(4): 91−97. [Wang Xu, Zhou Aiguo, Sun Ziyong, et al. Distribution and change characteristics of glacial lakes in western Nyainqentanglha range during 1972−2009[J]. Geological Science and Technology Information, 2012, 31(4): 91−97.]

[22] 赵航. 基于Landsat−8遥感影像的高亚洲地区冰湖提取方法研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018. [Zhao Hang. The Research of Glacial Lake Extraction based on Landsat− 8 OLI Imagery in High Mountain Region of Asian[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018.]

[23] 李晓雪. 基于人工神经网络的西藏黄湖危险性评价[C]//中国水利学会2016学术年会论文集(上册). 中国水利学会, 2016: 7. [Li Xiaoxue. Risk Assessment of Yellow Lake in Tibet Based on Artificial Neural Network[C]//Papers for 2016 Annual Conference (Part I). Chinese Hydraulic Engineering Society, 2016: 7.]

[24] 赵航, 陈方, 张美美. 基于改进C-V模型的冰湖轮廓提取方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(1): 177− 184. [Zhao Hang, Chen Fang, Zhang Meimei, Research of glacial lake contur extraction method based on improved C-V model[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(1): 177−184.]

[25] 骆剑承, 盛永伟, 沈占锋, 等. 分步迭代的多光谱遥感水体信息高精度自动提取[J]. 遥感学报, 2009, 13(4): 604−615. [Luo Jiancheng, Sheng Yongwei, Shen Zhanfeng, et al. Automatic and high- precise extraction for water information from multispectral images with the step- by- step iterative transformation mechanism [J]. Journal of Remote Sensing, 2009, 13(4): 604−615.]

[26] 李均力, 盛永伟, 骆剑承. 喜马拉雅山地区冰湖信息的遥感自动化提取[J]. 遥感学报, 2011, 15(1): 29−43. [Li Junli, Sheng Yongwei, Luo Jiancheng. Automatic extraction of Himalayan Glacial Lakes with remote sensing[J]. Journal of Remote Sensing, 2011, 15(1): 29−43.]

[27] Miles K E, Willis I C, Benedek C L, et al. Toward monitoring surface and subsurface lakes on the Greenland ice sheet using Sentinel−1 SAR and Landsat−8 OLI imagery[J]. Frontiers in Earth Science, 2017, 5: 58. Doi: 10. 3389/feart. 2017. 00058.

[28] Wangchuk S, Bolch T, Zawadzki J. Towards automated mapping and monitoring of potentially dangerous glacial lakes in Bhutan Himalaya using Sentinel− 1 Synthetic Aperture Radar data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2019, 40(12): 4642−4667.

[29] Paul F, Andreas Kääb, Maisch M, et al. The new remote-sensing-derived Swiss glacier inventory: II. First results[J]. Annals of Glaciology, 2002, 34(1): 355−361.

[30] Hanshaw M N, Bookhagen B. Glacial areas, lake areas, and snow lines from 1975 to 2012: Status of the Cordillera Vilcanota, including the Quelccaya Ice Cap, northern central Andes, Peru[J]. The Cryosphere, 2014, 8(2): 359−376.

[31] 姚晓军, 刘时银, 韩磊, 等. 冰湖的界定与分类体系——面向冰湖编目和冰湖灾害研究[J]. 地理学报, 2017, 72(7): 1173−1183. [Yao Xiaojun, Liu Shiyin, Han Lei, et al. Definition and classification systems of glacial lake for inventory and hazards study[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(7): 1173−1183.]

[32] 王建. 现代自然地理学[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 2001. [Wang Jian. Modern Physical Geography[M]. Beijing: Beijing Normal University Publishing Group, 2001.]

[33] Li G, Lin H. Recent decadal glacier mass balances over the Western Nyainqentanglha Mountains and the increase in their melting contribution to Nam Co Lake measured by differential bistatic SAR interferometry[J]. Global and Planetary Change, 2017, 149: 177−190.

[34] 王欣, 丁永建, 张勇. 冰川融水对山地冰冻圈冰湖水文效应的影响[J]. 湖泊科学, 2019, 31(3): 609−620. [Wang Xin, Ding Yongjian, Zhang Yong. The influence of glacier meltwater on the hydrological effect of glacial lakes in Mountain Cryospher[J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(3): 609−620.]

[35] 王旭, 周爱国, Siegert Florian, 等. 念青唐古拉山西段冰川1977—2010年时空变化[J]. 地球科学, 2012, 37(5): 1082−1092. [Wang Xu, Zhou Aiguo, Siegert Florian, et al. Spatiotemporal changes of glaciers in the western section of the Tangnula Mountains in Nianqing from 1977 to 2010[J]. Earth Science, 2012, 37(5): 1082−1092.]

[36] Wu K, Liu S, Guo W, et al. Glacier change in the western Nyainqentanglha Range, Tibetan Plateau using historical maps and Landsat imagery: 1970− 2014[J]. Journal of Mountain Science, 2016, 13(8): 1358−1374.

Spatial changes of the glacial lakes in the western Nyainqentanglha Range

TAO Jing[1], ZHAO Wenji[1], WANG Xu[2], XUE Jin[3]

(1. College of Resources Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China;
2. School of Geography and Information Engineering, China University of Geosciences, Wuhan 430074, Hubei, China; 3. Shenzhen Longhua District Development Research Institute, Shenzhen 518110, Guangdong, China)

Abstract: Based on the multi-source remote sensing image and DEM data, we analyzed the distribution and analysis of different dimensions of glacial lakes in western Nyainqentanglha from 1991 to 2017. Then we analyzed the relationship between changes in ice lakes and temperature and precipitation. The research results showed that the number and area of ice lakes in the study area had increased recently. They increased steadily from 1991 to 2006 and expanded from 2006 to 2107. The number of ice lakes increased by 161, and the area by 1.185 km^2 in 26 years. The area and number of ice lakes are increasing in the middle-and high-altitude range. The newly-added ice lakes are mainly 5400−5700 m above sea level, and the number of ice lakes accounts for 72.41% of the total number. The distribution and growth rates of glacial lakes with different aspects are different. The glacial lake on the southwest slope grew rapidly, while the north slope's glacial lake grew slowly. Glacier melting caused by rising temperatures is an indirect factor for ice lake growth, and precipitation is an essential factor for ice lake growth. Ice lakes with smaller area grades have a more sensitive response to climate and more significant changes. Ice lakes with larger area grades have stronger stability and smaller changes. The dynamic change of ice lakes is closely related to climate change, and it is instructive for predicting glaciers change and ice lake collapse disasters in western Nyainqentanglha.

Keywords: western Nyainqentanglha Range; remote sensing; glacial lake; climate change